

透水性の空間分布を考慮したダム基礎の水みちの確率評価

PROBABILISTIC EVALUATION ON UNDERSEEPAGE OF DAM FOUNDATION ROCK CONSIDERING SPATIAL CORRELATION IN PERMEABILITY DISTRIBUTION

佐藤弘行*・山口嘉一**

Hiroyuki SATOH and Yoshikazu YAMAGUCHI

The dispersion generally exists in the permeability of the dam rock foundation and its distribution width extends over several orders. In order to rationally carry out the grouting in the dam rock foundation with such large dispersion in the permeability, it is necessary to grasp the characteristics of underseepage and to evaluate grouting effects in the permeability field with the dispersion. In this study, in order to examine the effects of the dispersion in the permeability on underseepage characteristics of dam rock foundation, we carried out seepage analyses with giving the permeability coefficients of dam rock foundation using random numbers. In addition, we suggest a probabilistic method which can quantitatively evaluate the effects of the spatial permeability distribution on the main flow path.

Key Words: dam, seepage, grouting, Geostatistics, correlation of permeability

1. はじめに

ダムを建設する際には、建設候補地点において様々な調査が行われる。ダムの基礎岩盤については、その力学的特性のほか、透水性に関する調査が行われる。ダム基礎岩盤の透水性調査としては一般的にボーリング孔を用いた原位置透水試験が行われるが、その最も一般的な方法がルジオン試験である。ルジオン試験は岩盤に掘られたボーリング孔に多段階の一定圧力で水を注入し、注入された水の量から試験地点の透水性を評価する方法である。この時、ボーリング孔の設置位置は離散的であり、またその数には限りがあるため、ダム基礎岩盤全体の透水性分布を推定するためには、ルジオン試験結果を基に地質情報などを加味して、透水性分布を総合的に推定する必要がある。従来この作業の多くは経験豊富な技術者の判断に基づいて行われてきた。

一方、このようなダム基礎岩盤などの地盤において、限られた数の観測値を有効に利用して物性値の空間分布を推定する方法として地球統計学がある¹⁾。地球統計学は本研究で対象としている地盤の透水性の推定だけでなく、基礎地盤高²⁾の推定や基礎の支持力の推定³⁾など、物性値などの空間分布の推定に有効なツールとして各分野で開発が行われている。

ダム基礎岩盤における透水性の推定に関して、従来の方法は安全なダムを建設するのに十分に機能しているが、限られた数の透水性のデータから全体の透水性分布を精度良く推定し、さらに透水性のばらつきが浸透特性に及ぼす影響を定量的に評価できれば、透水性調査やグラウチングを合理的かつ効率的に行うことができ、結果として安全性を損なうことなくコスト削減が達成できるものと考えている。

本研究では、ダム基礎岩盤における透水性のばらつきが浸透特性に及ぼす影響の検討として、地球統計学の空間分布のシミュレーション手法を用いて空間的な相関を有する透水係数分布を発生させ、それを入力物性値とし

* 正会員 工修 独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム研究員

** 正会員 工博 独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム上席研究員

た浸透流解析のモンテカルロシミュレーションを行い、その結果をもとにして水みちを確率的に評価する手法を提案し、透水係数の空間的な相関が水みちに与える影響についての基礎的な検討を行った。

2. 解析方法

解析領域は図-1 に示すとおり、フィルダムコア部及び基礎岩盤を模擬したものである。基礎岩盤は $4\text{m} \times 4\text{m}$ の正方形要素に分割した。基礎岩盤の透水係数は対数正規分布に従うと仮定し、その平均は m/s 単位の常用対数で-5、標準偏差 σ は常用対数で 0.3、1.2 と変化させて乱数を発生させた。また、地球統計学のシミュレーション手法である Sequential Gaussian Simulation (SGS) ¹⁾ を用いて、空間的な相関性を有する乱数を発生させた。空間的な相関性については、等方的な場合（水平・鉛直方向の相関距離 30m）、異方的な場合（水平方向の相関距離 150m、鉛直方向の相関距離 20m）についてそれぞれ乱数を発生させた。コア、カーテングラウチングおよびブランケットグラウチングの透水係数は、それぞれ $1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 、 $2 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 、 $5 \times 10^{-7} \text{m/s}$ で一定の値とした。グラウチングについては、グラウチング未施工、ブランケットグラウチングを施工しかつカーテングラウチングの深度 52m および 100m の場合を想定した。表-1 に透水係数の発生方法のケースを示す。表-1 の Case2-1-C0 から 2-3-C0 のケースについて、1 realization の基礎岩盤部 2875 要素の透水係数の頻度分布を図-2 に、空間分布を図-3 上段にそれぞれ示す。図-2 を見ると、概ね想定した頻度分布が得られている。表-1 の各ケースについてそれぞれ 100 回のシミュレーションを行い、統計処理を行った。図-4 に、Case2-2-C0 と Case2-3-C0 の水平 x 方向、鉛直 y 方向のバリオグラムの 100realizations の平均を示すが、概ね想定した相関距離が得られている。なお、理論バリオグラムには式(1)の指数関数型を用いており、標本バリオグラムは式(2)により求められる。

表-1 解析ケース

#case	分布	標準偏差	空間的相関	カーテングラウチング
Case1-1-C0	対数正規分布	0.3	なし	なし
Case1-2-C0		0.3	等方	なし
Case1-3-C0		0.3	異方	なし
Case1-1-C52		0.3	なし	あり(深度52m)
Case1-2-C52		0.3	等方	あり(深度52m)
Case1-3-C52		0.3	異方	あり(深度52m)
Case1-1-C100		0.3	なし	あり(深度100m)
Case1-2-C100		0.3	等方	あり(深度100m)
Case1-3-C100		0.3	異方	あり(深度100m)
Case2-1-C0		1.2	なし	なし
Case2-2-C0		1.2	等方	なし
Case2-3-C0		1.2	異方	なし
Case2-1-C52		1.2	なし	あり(深度52m)
Case2-2-C52		1.2	等方	あり(深度52m)
Case2-3-C52		1.2	異方	あり(深度52m)
Case2-1-C100		1.2	なし	あり(深度100m)
Case2-2-C100		1.2	等方	あり(深度100m)
Case2-3-C100		1.2	異方	あり(深度100m)

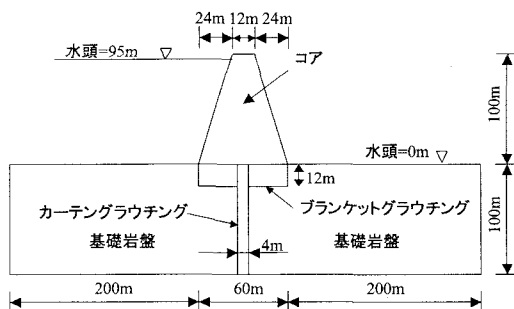


図-1 解析モデル

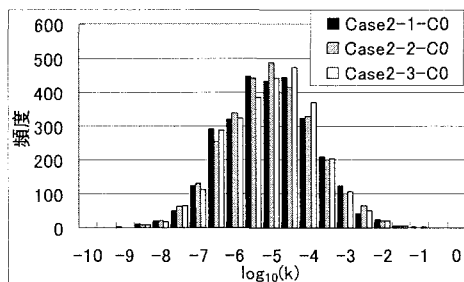


図-2 基礎岩盤の透水係数の頻度分布（単位は m/s ）

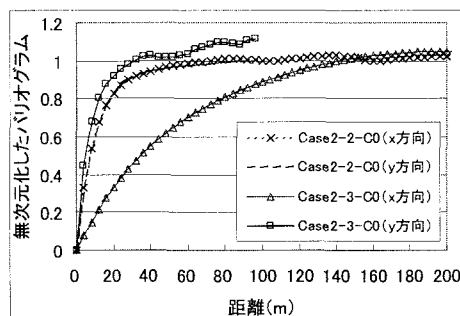


図-4 Case2-2-C0 と Case2-3-C0 の x 方向と y 方向のバリオグラム（100realizations の平均）

$$\gamma(h) = \sigma^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{3h}{L}\right) \right] \quad (1) \quad \gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x) - z(x+h)]^2 \quad (2)$$

式(1)、(2)で、 γ はバリオグラム、 h は相関距離、 $N(h)$ は距離が h になる観測値の組合せの数、 $z(x)$ は x における観測値、 σ^2 はシル、 L はレンジ、である。また、図-4の縦軸は分散で無次元化している。

3. 解析結果

図-3に、乱数の発生方法の違いによる透水係数分布、流速分布、クラスター分布の一例を示す。クラスターとは、大きな流速の要素が上下流につながった時の要素のつながりのことである。図-3を見ると、透水係数分布に空間的な相関がある場合、特に異方的な相関がある場合に、流速分布に選択的な浸透が発生している。

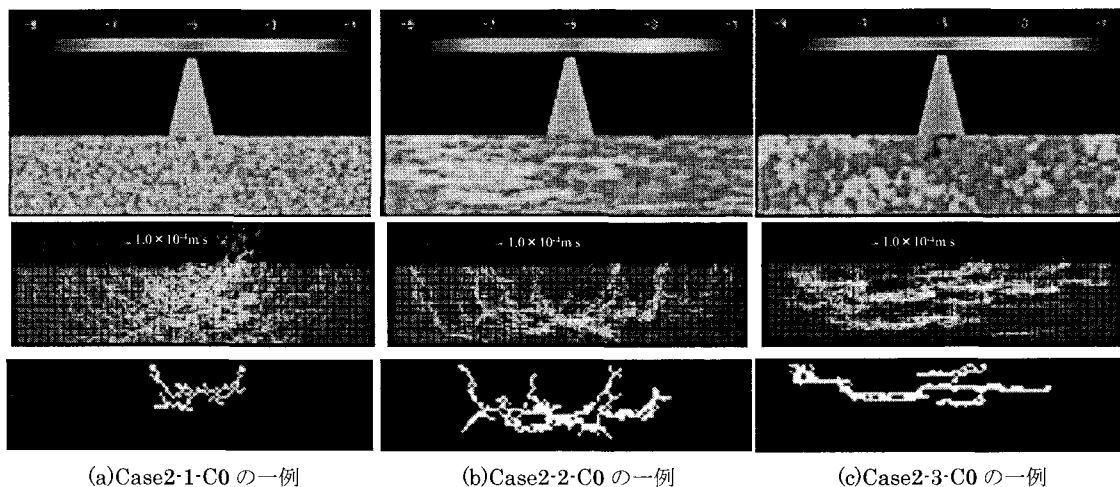


図-3 乱数の発生方法の違いによる浸透特性の変化

(上段：透水係数分布、中段：流速分布、下段：クラスター分布)

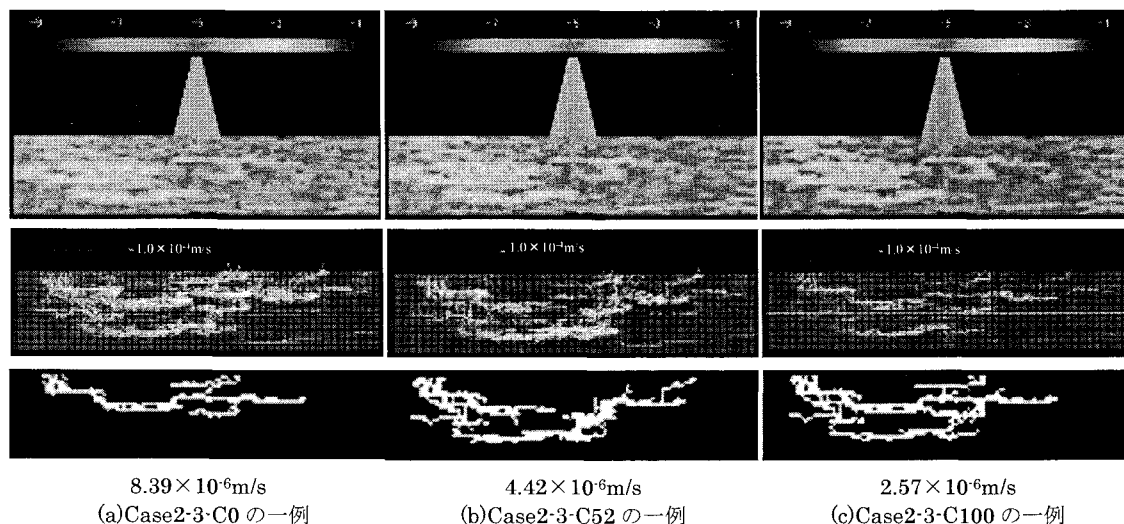


図-5 カーテングラウチングの深度による浸透特性の変化

(上段：透水係数分布、中段：流速分布、下段：クラスター分布、数値：パーコレーション閾値)

カーテングラウチングの深度を変化させた時の、透水係数分布、流速分布、クラスター分布、パーコレーション閾値の例を図-5に示す。パーコレーション閾値については参考文献⁴⁾を参照されたい。カーテングラウチングの深度が深くなるにつれて、カーテングラウチング施工深度に対応する流速が小さくなり、全体的に流速が小さくなるためにクラスターが大きくなり、パーコレーション閾値が小さくなる傾向にある。

なお、浸透流量の結果など解析結果の詳細は参考文献⁵⁾、⁶⁾を参照されたい。

4. 水みちの確率評価の検討

4.1 水みちの確率評価方法

透水性の空間的なばらつきを定量的に評価する方法としては、前述したバリオグラムなどがある。透水性の空間的なばらつきに依存する浸透特性のばらつきを定量的に評価する手法としては、浸透流量などのばらつきを評価する方法などがあるが、水みちを定量的に評価し、さらにはダム安全性を定量的に評価する方法は未だ確立されていないのが現状である。本論文では、浸透特性を定量的に評価する手法の提案として、浸透流解析結果である流速分布にパーコレーションを適用し、そこから得られるクラスターを浸透流解析における水みちと考え、浸透流解析のモンテカルロシミュレーションから水みちの確率評価を試みた。

本論文における水みちの確率評価の概念を図-6に示す。本論文では、水みちの確率評価を以下の方法で行った。

- ①乱数を用いて透水係数の空間分布をN個発生させた後、それらを入力値として浸透流解析をN回行う。N回の浸透流解析の結果に対して、パーコレーションの概念を用いて、水みちと想定されるクラスターをN個抽出する。
- ②①により抽出されたN個のクラスターを重ね合わせることで、各要素について、それぞれの要素がクラスターに含まれる確率を求める。

ここでは、表-1に示すケースでそれぞれ行った100回の浸透流解析の結果をもとに、水みちの確率評価を行った。

4.2 水みちの確率評価

図-7には透水係数の標準偏差が小さい場合($\sigma=0.3$)に要素がクラスターに含まれる確率分布を示し、図-8には透水係数の標準偏差が大きい場合($\sigma=1.2$)に要素がクラスターに含まれる確率分布を示す。図-7、図-8では、(a)空間的な相関がない場合、(b)等方的な相関がある場合、(c)異方的な相関がある場合、の3つの場合について、それぞれ、カーテングラウチングがない場合、深度52mの場合、深度100mの場合のそれぞれの結果を示している。

図-7の透水係数のばらつきが小さい場合($\sigma=0.3$)について見ると、カーテングラウチングの深度が同じ場合には、(c)異方的な相関がある場合のカーテングラウチング深度52mと100mの場合において、透水係数の分布が(a)と(b)の場合と多少異なる傾向を示しているが、要素がクラスターに含まれる確率は透水係数の空間分布によらずほぼ同じ傾向を示している。カーテングラウチングがない場合には(図-7上段)、コア着岩部付近の要素がクラスターに含まれる確率が80%以上と高い確率になっており、カーテングラウチングの深度が52mの時では(図-7中段)、カーテングラウチング直下の要素の確率が最も大きくなっており、カーテングラウチングの深度が100mの時では(図-7下段)、ブランケットグラウチング周辺の要素の確率が大きくなっている。

また、図-8の透水係数のばらつきが大きい場合($\sigma=1.2$)について見ると、カーテングラウチングの深度が同じでも、透水係数の空間分布が異なると、要素がクラスターに含まれる確率の傾向も異なっているが、いずれの場合においても確率の高い領域は見られず、透水係数のばらつきが大きい場合には水みちの経路が多様になることがわかる。カーテングラウチングがない場合(図-8上段)を見ると、(b)等方的な相関がある場合には深部まで水みちとなる場合があり、(c)異方的な相関がある場合には上下流方向に広い範囲で水みちとなる場合があることがわかる。グラウチングの深度が深くなるほどこのような傾向はより顕著となり、特に(c)異方的な相関がある場合には上下流方向にかなり広い範囲で水みちとなる場合があることがわかる。このように、透水係数のばらつきが大きい場合には、各要素が水みちとなる確率は、透水係数の空間的相関性にかかなり依存することがわかる。

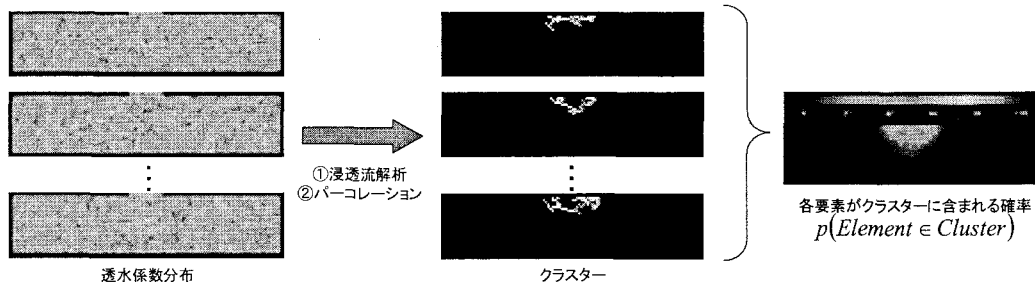


図-6 水みちの確率評価の概念図

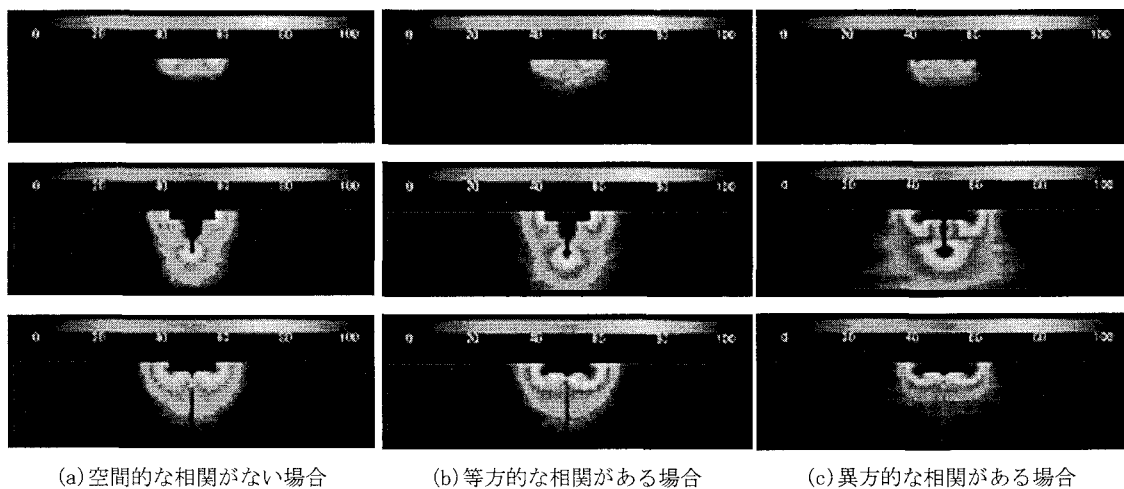


図-7 要素がクラスターに含まれる確率分布 ($\sigma=0.3$ の場合)
(上段から、カーテンなし、カーテン深度 52m、カーテン深度 100m)

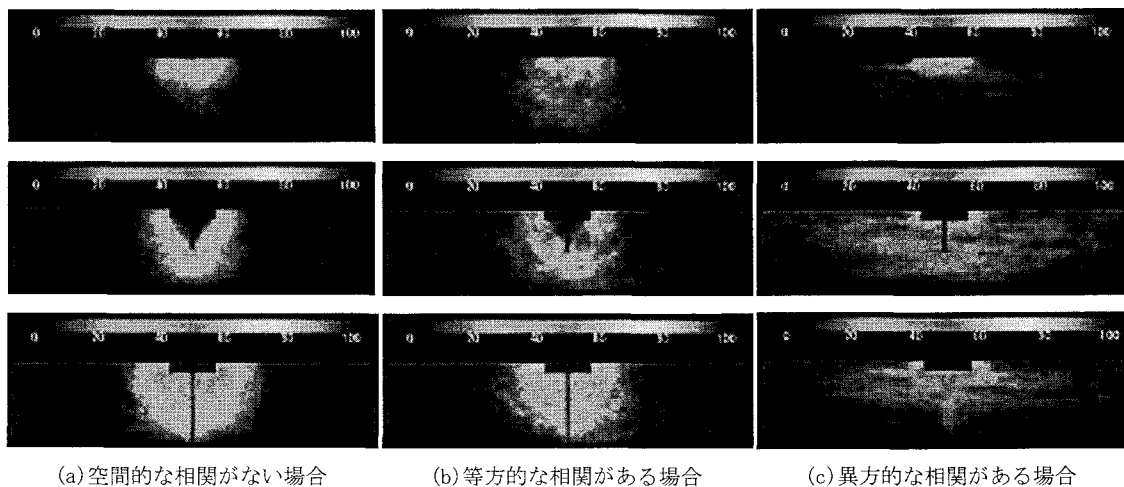


図-8 要素がクラスターに含まれる確率分布 ($\sigma=1.2$ の場合)
(上段から、カーテンなし、カーテン深度 52m、カーテン深度 100m)

なお、図-7と図-8には水みちの流速あるいは動水勾配の評価は入っていない。本来、ある要素がクラスターに含まれても、水みちの代表的な流速あるいは動水勾配が小さければ安全性の上では大きな問題とはならないと考えられるため、各要素が水みちとなる確率と同時に、水みちの代表的な流速あるいは動水勾配も考慮したうえで、水みちの確率評価を行うべきと考えられる。しかし、水みちの代表的な流速あるいは動水勾配の設定値についての課題が残されているため、本論文では図-7および図-8のクラスターのみに基づく確率評価にとどめている。水みちの代表的な流速あるいは動水勾配も考慮した水みちの確率評価については、別途報告したいと考えている。

5. おわりに

ダム基礎グラウチングの合理化・効率化を目的として、ダム基礎岩盤の透水性のばらつきがその浸透特性に与える影響の検討のため、浸透流解析のモンテカルロシミュレーションを行い、水みちの確率評価の方法を提案し基礎的な検討を行った。それにより、ダム基礎岩盤の透水係数のばらつきが小さい場合には、ダム基礎の各要素が水みちとなる確率は透水係数の空間分布にあまり依存しないが、透水係数のばらつきが大きい場合には、各要素が水みちとなる確率は透水係数の空間分布に大きく依存することがわかった。

今後は、水みちの代表的な流速あるいは動水勾配を考慮した水みちの確率評価を行うとともに、それらの結果をダム基礎グラウチングの設計に反映させる方法やグラウチングの合理的な評価方法についても検討していく予定である。

参考文献

- 1) Clayton V. Deutsch & Andre G. Journel : GSLIB, Geostatistical Software Library and User's Guide, Second Edition, 369p., 1998.
- 2) 本多眞、鈴木誠、上田稔、近藤寛通 : 地形情報を用いた基礎地盤面のモデル化と推定、土木学会論文集、No.561、III-38、pp.63-74、1997.
- 3) 白木渡、恒国光義、松島学、安田登 : 地盤物性値間の回帰関係を利用したコクリッキングによる送電線鉄塔基礎の支持力の推定、土木学会論文集、No.582、III-41、pp.47-58、1997.
- 4) 小田垣孝 : パーコレーションの科学 (第3版)、裳華房、1997.
- 5) 佐藤弘行、山口嘉一 : 透水性の空間的相関を考慮したシミュレーションによるダム基礎の浸透特性の検討、第39回地盤工学研究発表会講演集、CD-rom、2004.
- 6) 佐藤弘行、山口嘉一 : 透水性の空間的相関を考慮したシミュレーションによるダム基礎の浸透特性の検討 (第2報)、第59回土木学会年次学術講演会講演概要集、CD-rom、2004.